

УДК 621.923

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ
ОБРАБОТКИ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ ВИНТОВЫХ КОНВЕЙЕРОВ
ДЛЯ ПОДЪЕМА ЗЕРНА МЕТОДОМ ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА**

Леонид Михайлович Акулович

доктор технических наук, профессор

leo-akulovich@yandex.ru

Михаил Михайлович Дечко

кандидат технических наук, доцент

dech37106@gmail.com

Леонид Ефимович Сергеев

кандидат технических наук, доцент

l.sergeev.mail@gmail.com

Максим Владимирович Дорошенко

студент

Белорусский государственный аграрный технический университет

г. Минск, Беларусь

Аннотация. Приведены результаты исследований технологических режимов магнитно-абразивной обработки беговых дорожек колец подшипников винтовых конвейеров для подъема зерна с использованием факторного анализа. За счет сокращения числа исходных параметров, сильно коррелирующих между собой, установлены обобщенные переменные, что позволяет производить оценку синергического эффекта при взаимодействии технологических режимов.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, магнитная индукция, корреляция, факторный анализ, обобщенные параметры.

Эксплуатационная нагрузка (скорость перемещения, давление, нагрев, воздействие окружающей среды и т.п.) большинства деталей сельскохозяйственной техники воспринимается, в основном, их поверхностным слоем. Поэтому работоспособность таких деталей (износостойкость рабочих поверхностей, усталостная прочность, коррозионная стойкость) зависит от сопротивления поверхностного слоя разрушению.

Технический парк в сельском хозяйстве содержит значительное количество подъемно-транспортных устройств, входящих, как в мобильные машины, так и работающих стационарно [1]. Например, для подъема зерна применяют вертикальные винтовые конвейеры. Анализ проведенных исследований показал, что основным недостатком винтовых конвейеров (особенно крутонаклонных и вертикальных) является высокая нагрузка на подшипниковый узел [2]. Подшипниковый узел – один из наиболее распространенных механизмов в оборудовании для пищевой промышленности, для которого требуется защита поверхностей от химического воздействия частиц продуктов или специальная их обработка с целью противодействовать скоплению бактерий при эксплуатации в условиях повышенной влажности. Базовыми деталями подшипникового узла являются кольца подшипников, у которых наиболее нагруженные поверхности – это беговые дорожки, имеющие сложный профиль и требующие финишной обработки. В сельскохозяйственном машиностроении около 80 % рабочих поверхностей деталей машин подвергается финишной обработке, удельная трудоемкость которой составляет (20÷45) % в общей трудоемкости изготовления изделий [3]. Усложнение формы поверхностей деталей при финишной обработке создает проблему технологического плана, заключающуюся в обеспечении точности формы и эксплуатационных показателей качества поверхностного слоя. Так как основные свойства поверхности формируются в процессе изготовления на финишных операциях, то для финишной обработки сложнопрофильных поверхностей наибольшее применение получили абразивные [4] и электрофизические методы [5]. Однако для реализации абразивной обработки

требуется изготовление соответствующих сложнопрофильных абразивных кругов, а для электрофизических – специальных инструментов-электродов, форма рабочей поверхности у которых является зеркальным отображением обрабатываемой поверхности. Фазовые и структурные превращения, происходящие в поверхностных слоях обрабатываемых изделий, обусловлены действием высоких температур, образующихся в зоне контакта абразивного инструмента с деталью. К основным дефектам обработки абразивным кругом, брусом или лентой, значительно изменяющим физико-механические свойства материала детали, относят появляющиеся при этом прижоги, остаточные растягивающие напряжения, нарушения однородности структуры и увеличение размеров зерна материала, что способствует возникновению трещин и питтинга. Появление в результате обработки жестким абразивным инструментом прижогов и сопутствующих им дефектов поверхностного слоя материала детали обусловлено тепловой напряженностью в зоне контакта абразивного зерна и детали [3]. При финишной обработке сложнопрофильных поверхностей, имеющих переменную кривизну, абразивным инструментом с жестко связанными абразивными зёрнами имеет место изменение значений фактических углов резания (переднего, заднего, углов в плане). В связи с этим на отдельных участках обрабатываемых поверхностей возникают погрешности формы и разброс шероховатости. В результате параметры качества на различных участках поверхностей отличаются друг от друга, и для обеспечения требований чертежа требуется дополнительная доводочная операция, которая выполняется, как правило, вручную и является трудоемкой. При традиционном шлифовании геометрически сложных поверхностей профилированным инструментом проблематично обеспечить высокую точность и низкую шероховатость поверхности в труднодоступных (переходных) зонах. Поэтому финишную обработку сложнопрофильных поверхностей целесообразно проводить подвижно скоординированными абразивными зёрнами, связующим фактором которых служит энергия магнитного, ультразвукового или других полей. В незакрепленном состоянии абразивные зёрна более полно используют

свои режущие способности, так как происходит нивелирование их рабочих кромок относительно обрабатываемой поверхности, а также переориентация и перемещение абразивного порошка в процессе обработки. Одним из перспективных методов является магнитно-абразивная обработка (МАО) [6]. Контур режущего инструмента (ферроабразивная щетка) в зазоре между обрабатываемой поверхностью и полюсным наконечником электромагнита формируется из ферроабразивного порошка (ФАП) силами магнитного поля при наличии смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС). В реальных условиях контактирование обрабатываемого материала и ФАП носит дискретный характер и изменяется в зависимости от величины силы магнитного поля и физико-механических свойств контактируемых материалов. Поскольку ФАП находится в подвижно скоординированном состоянии, это позволяет управлять жесткостью режущего инструмента, путем регулирования величины магнитной индукции. Особенность технологического процесса МАО заключается в отсутствии жесткого закрепления абразивного зерна в связке, что исключает возникновение в зоне микрорезания критических давлений и температур. Основными физико-механическими показателями качества поверхностного слоя при МАО, выбранными в нашем исследовании, являются шероховатость поверхности после обработки Ra_0 , размер блоков когерентного рассеяния в поверхностном слое Δg , напряжения I-го рода ΔP .

При реализации процесса МАО существует множество вариантов назначения технологических режимов и выбора постоянных факторов, каждый из которых учитывает разнообразные условия эксплуатации изделий и предъявляемые к ним требования. Выбор из множества вариантов одного конкретного сочетания факторов при МАО беговых дорожек подразумевает, в явном или скрытом виде, реализацию синергических эффектов, связанных с достижением свойств, отличных от суммы свойств факторов, воздействующих по отдельности.

Несмотря на то, что термин синергизм широко используется как в теоретических, так и в прикладных исследованиях, интерпретация этого

термина носит авторский характер [7]. Термин синергизм остается недостаточно формализованным, учитывая сложность исследуемых явлений. Ключевым моментом, определяющим возможность понимания особенностей взаимодействия, является понятие эффекта, которое должно быть четко определено и поддаваться корректному измерению. Для MAO беговых дорожек колец подшипников, как и многих других процессов обработки, существует множество неиспользованных возможностей, связанных с синергическим действием факторов. Сложности заключаются в наличии множества неконтролируемых факторов и в отсутствии возможности выделить явления или процессы одной физической природы, зависящие от небольшого числа переменных и представить результаты хорошо интерпретируемыми функциональными зависимостями, параметры которых, имеют физический смысл. До настоящего времени не разработаны научно обоснованные подходы для количественной оценки эффектов взаимодействий технологических факторов, что не позволяет полностью раскрыть потенциальные возможности процесса MAO.

Количественная оценка синергических эффектов заключается в поиске адекватных математических моделей, содержащих параметры, характеризующие эффект синергизма. В связи с этим количественный анализ эффектов синергизма состоял в оценке численных значений параметров математических моделей и обобщенных характеристик, отражающих взаимодействие технологических факторов. Таким образом, разработка методов целенаправленного создания математических моделей на базе синергических систем следует рассматривать как мощный инструмент определения требуемых значений основных параметров процесса MAO и представляет собой актуальную задачу.

Изучение структуры параметров процесса MAO, а также выявление их однородных групп осуществлено с помощью факторного анализа [8, 9]. Идея метода факторного анализа состоит в сжатии матрицы признаков в матрицу с меньшим числом переменных, сохраняющую почти ту же самую информацию,

что и исходная матрица, т.е. сконцентрировать исходную информацию, выражая большое число рассматриваемых признаков через меньшее число более емких внутренних характеристик.

При этом предполагается, что наиболее емкие характеристики окажутся одновременно и наиболее существенными, определяющими. Задачами факторного анализа являются: сокращение числа переменных (редукция данных) и определение структуры взаимосвязей между переменными, т.е. классификация переменных, поэтому факторный анализ используется как метод сокращения данных или как метод структурной классификации. Использование метода главных компонент состоит в построении факторов – главных компонент, каждый из которых представляет линейную комбинацию исходных признаков.

Первая главная компонента F_1 определяет такое направление в пространстве исходных признаков, по которому совокупность объектов (точек) имеет наибольший разброс (дисперсию). Вторая главная компонента F_2 строится с расчетом, чтобы ее направление было ортогонально направлению F_1 и она объясняла как можно большую часть остаточной дисперсии – и т.д., вплоть до главной компоненты F_m . Так как выделение главных компонент происходит в убывающем порядке с точки зрения доли объясняемой ими дисперсии, то признаки, входящие в первую главную компоненту, оказывают максимальное влияние на дифференциацию изучаемых объектов.

Исследования МАО были проведены при обработке беговых дорожек шариковых подшипниках 1000812 ГОСТ 8338–75 из стали ШХ-15. Исследуемые (управляющие) факторы представлены в таблице 1, а параметры оптимизации – в таблице 2. Исходные значения параметров были получены в серии экспериментов, выполненных по матрице планирования ротатабельного плана для шести управляющих факторов (см. табл. 1).

Значения исходных параметров Δg и Ra дополнительно преобразовывались с помощью функций, обеспечивающих наилучшее приближение их распределений к нормальному, чтобы описать взаимосвязь

исходных параметров с помощью матрицы линейной корреляции. Корреляционная матрица преобразована методом главных компонент к 3-м взаимонезависимым параметрам F_1 – F_3 .

Таблица 1

Управляющие факторы в процессе МАО

Факторы технологических режимов МАО	Единица измерения	Диапазон варьирования		Обозначение
		min	max	
Скорость вращения заготовки, V	м/с	1,15	5,85	X_1
Скорость осцилляции полюсных наконечников, v_0	м/с	0,121	0,319	X_2
Величина магнитной индукции, B	Т	0,42	0,98	X_3
Амплитуда осцилляции полюсных наконечников, A	мм	0,55	2,25	X_4
Исходная шероховатость поверхности, Ra_0	мм	0,305	1,295	X_5
Время обработки, t	с	17,6	102,4	X_6

Таблица 2

Факторные нагрузки для обобщенных и исходных параметров

Исходные параметры производительности и качества в натуральных и преобразованных значениях	Обобщенные параметры		
	F_1	F_2	F_3
Удельный съём массы металла с обработанной поверхности $ln(\Delta g)$	0,916	0,002	0,057
Размерный съём по дну беговой дорожки ΔD_1	-0,893	-0,012	0,218
Размерный съём по стенке беговой дорожки ΔD_2	-0,887	0,086	0,134
Шероховатость поверхности после обработки $ln(Ra)$	0,902	-0,070	-0,015
Изменение размера блоков когерентного рассеяния в поверхностном слое $f(\Delta g_1)$	0,005	-0,861	0,141
Изменение напряжения 2-го рода в поверхностном слое Δg_2	-0,086	0,871	0,121
Изменение напряжения 1-го рода ΔP	-0,203	-0,109	0,681
Содержание аустенита в поверхностном слое ΔA	0,049	0,089	0,823

К первому обобщенному параметру принадлежат все исходные параметры, связанные с удалением материала с поверхности; ко второму – параметры, характеризующие микродеформации поверхностного слоя; к третьему – параметры, связанные с микроструктурными изменениями поверхностного слоя.

Анализ влияния факторов МАО на обобщенные параметры производили на основе адекватных уравнений регрессии в виде полиномов второго порядка, дополненных трехфакторными взаимодействиями:

$$F_1 = 0,1416X_1 + 0,4842X_3 + 0,3598X_4 + 0,2035X_5 + 0,2716X_6 + 0,2425X_2X_3 + 0,2657X_2X_4 + 0,1599X_3X_4 + 0,2004X_1X_2X_3 + 0,1599X_1^2;$$

$$F_2 = -0,1987X_2 - 0,1410X_6 - 0,1762X_2X_5 - 0,3139X_3X_5 - 0,1597X_3X_6 - 0,2308X_1X_2X_3 + 0,1921X_1X_3X_5 - 0,1718X_1X_4X_6 - 0,1627X_1X_5X_6 - 0,1907X_2X_3X_5 - 0,2110X_2X_4X_6 + 0,1719X_3X_5X_6 - 0,1285X_2^2 + 0,1010X_5^2;$$

$$F_3 = -0,2686 + 0,1965X_1X_3 - 0,1813X_2X_6 - 0,2110X_4X_6 + 0,1875X_5X_6 - 0,3008X_2X_3X_4 + 0,1726X_2X_3X_5 - 0,3150X_2X_4X_5 + 0,2298X_2X_5X_6 - 0,2131X_3X_5X_6 + 0,1288X_4^2 + 0,1795X_5^2.$$

Анализ коэффициентов регрессии показывает значительное взаимовлияние технологических факторов МАО, подтверждаемое статистической значимостью коэффициентов регрессии при двойных и тройных факторных взаимодействиях. На рисунке показан относительный вклад факторов и их взаимодействий на изменение обобщенных параметров поверхности после МАО. Установлено, что для всех обобщенных параметров одним из превалирующих факторов является величина магнитной индукции.

Для первого обобщенного параметра, связанного с удалением материала с поверхности, важное значение имеет двойное факторное взаимодействие v_0A , что определяет скорость распределения давления по обрабатываемой поверхности. Магнитная индукция B выполняет функцию силового фактора как давление инструмента на обрабатываемую поверхность, что определяет размерный и массовый слой материала.

Для второго обобщенного параметра главное значение имеют двойное BRa_0 и тройное Vv_0B взаимодействия, которые характеризуют проникновение магнитного потока на глубину дефектного слоя и его воздействие многократными импульсами перемангничивания, генерируемыми электромагнитным полем.

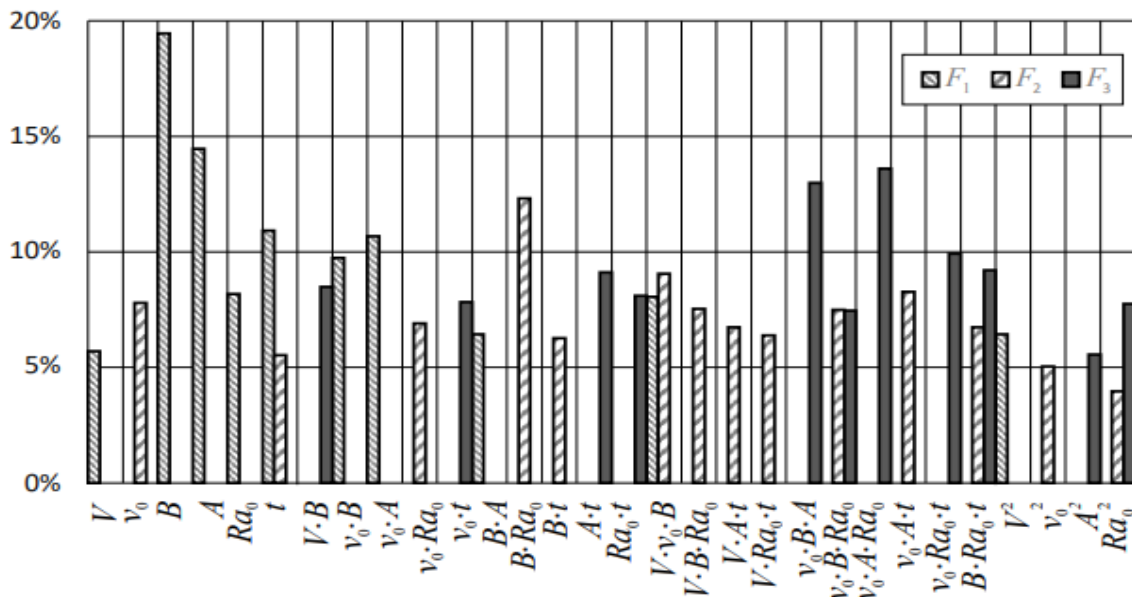


Рисунок 1 – Относительный вклад факторов MAO и их взаимодействий в изменение обобщенных параметров поверхности после MAO

Изменение размера блоков когерентного рассеяния в поверхностном слое происходит вследствие активизации электромагнитным полем волн напряжений релаксационных процессов. Каждый микрообъем поверхностного слоя испытывает действие циклически изменяющихся сил магнитного притяжения, индукционных токов (пинч-эффект) и выделяемой ими теплоты. Для третьего обобщенного параметра основное значение имеют тройные v_0ARa_0 и v_0BA взаимодействия, которые определяют циклические магнитострикционные деформации и напряжения. Под этим воздействием в процессе MAO остаточный аустенит превращается в бесструктурный мартенсит. Находящиеся ближе к поверхности слои металла более податливы к деформациям под действием циклических изменяющихся напряжений магнитострикционного происхождения, что приводит к росту остаточных сжимающих напряжений.

Магнитострикционный механизм изменений в строении поверхностного слоя является одним из основных, приводящих к фазовым превращениям и диффузионным явлениям, которые в конечном итоге обеспечивают повышение эксплуатационных свойств поверхности. Пластическое деформирование приповерхностного слоя в процессе МАО, сопровождающееся на закаленных сталях распадом остаточного аустенита, приводит к созданию в приповерхностном слое остаточных напряжений сжатия, независимо от знака остаточных напряжений, имевших место после предшествовавшей обработки.

Список литературы:

1. Евсюков В.Н. Система управления технологическими процессами пищевых производств. Оренбург: Учебная литература, 2009. 178 с.
2. Халин С.А. Формирование системы инновационного развития пищевой промышленности: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 – экономика и управление народным хозяйством: теория управления экономическими системами; макроэкономика; экономика, организация и управление предприятиями, отраслями, комплексами; управление инновациями; региональная экономика; логистика; экономика труда. Орел, 2012. 150 с.
3. Энциклопедия машиностроения. Т. III. Технология изготовления деталей машин / А.М. Дальский [и др.]. М.: Машиностроение, 2000. Т.3. 420 с.
4. Обработка деталей свободным абразивом в вибрирующих резервуарах / М.Н. Карташов [и др.]. Киев: Вища школа, 1975. 188 с.
5. Технологические процессы механической и физико-химической обработки в авиадвигателестроении / В.Ф. Безъязычный [и др.]. М.: Машиностроение, 2007. 538 с.
6. Акулович Л.М., Сергеев Л.Е. Основы профилирования режущего инструмента при магнитно-абразивной обработке / БГАТУ. Минск, 2014. 280 с.
7. Наумова Ю.А. Синергические системы в многокомпонентных эластомерных материалах: идентификация, анализ, формирование: дис. ... канд.

хим. наук: 05.17.06 – технология и переработка полимеров и композитов. М., 2017. 308 с.

8. Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.И. Многомерные статистические методы: Учебник. М.: Финансы и статистика, 2005. 352 с.

9. Многомерный статистический анализ в экономике: Учеб. пос. для вузов / Л.А. Сошникова [и др.]. М.: ЮНИТИ–ДАНА, 2003. 598 с.

UDC 621.923

**INVESTIGATION OF MAGNETIC ABRASIVE TREATMENT OF SCREW
CONVEYOR BEARING RINGS FOR GRAIN LIFTING BY FACTOR
ANALYSIS**

Leonid M. Akulovich

Doctor of Technical Sciences, Professor

leo-akulovich@yandex.ru

Mikhail M. Dechko

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

dech37106@gmail.com

Leonid E. Sergeev

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

l.sergeev.mail@gmail.com

Maksim V. Doroshenko

Student

Belarusian State Agrarian Technical University

Minsk, Belarus

Annotation. The results of studies of technological modes of magnetic-abrasive treatment of race tracks of bearings of screw conveyors for grain lifting using factor analysis are given. Due to reduction of number of initial parameters,

which strongly correlate with each other, generalized variables are established, which makes it possible to estimate synergistic effect at interaction of technological modes.

Key words: magnetic abrasive processing, magnetic induction, correlation, factor analysis, generalized parameters.

Статья поступила в редакцию 28.10.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021; принята к публикации 10.12.2021.

The article was submitted 28.10.2021; approved after reviewing 30.11.2021; accepted for publication 10.12.2021.